

УДК 523.98

Солнечные радиовсплески и ускорение солнечных космических лучей

Ю. Т. Цап, Е. А. Исаева

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, АР Крым, Научный
yur@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 29 ноября 2011 г.

Аннотация. Используя наблюдательные данные за период с 1989 по 2005 г., полученные на спутниках GOES и Wind, а также наземной службой Солнца RSTN, рассмотрена связь между интенсивностью потока протонов I_p с энергиями $E_p > 1 - 100$ МэВ и параметрами радиовсплесков для 107 протонных событий. Установлено, что 73 % и 77 % событий сопровождались радиовсплесками II типа соответственно в метровом (m II, 25–299 МГц) и декаметровом-гектометровом (DH II, 0.02–14 МГц) диапазонах длин волн. Коэффициент корреляции между I_p и скоростью частотного дрейфа всплесков II типа V_{II} не превысил 0.40. Для всплесков m II с ростом V_{II} интенсивность I_p увеличивалась, тогда как для DH II – уменьшалась. Корональные ударные волны ускоряют протоны эффективнее межпланетных, и с увеличением энергии частиц E_p их вклад возрастает. Ускорение солнечных космических лучей в области вспышечного энерговыделения является определяющим.

SOLAR RADIO BURSTS AND SOLAR ENERGETIC PARTICLE ACCELERATION, by Yu. T. Tsap, E. A. Isaeva. Using observed data for the period from 1989 to 2005 obtained with GOES and Wind satellites as well as the Radio Solar Telescope Network the relation between the proton flux intensity I_p with energies $E_p > 1 - 100$ MeV and radio burst parameters for 107 solar energetic events has been considered. It has been established that 73 % and 77 % events are accompanied by type II radio bursts in meter (m II, 25–299 MHz) and decameter-hectometer (DH II, 20 kHz–14 MHz) wavelength ranges, respectively. The correlation coefficient between I_p and the frequency drift velocity V_{II} did not exceed 0.40. Intensity I_p with V_{II} increases for m II bursts while it decreases for DH II ones. Coronal shock waves accelerate protons more effectively than interplanetary ones and their contribution to acceleration increases with an increase of particle energy E_p . The solar energetic particle acceleration in the region of flare energy release is dominated.

Ключевые слова: солнечные космические лучи, вспышки, ускорение протонов, ударные волны, радиовсплески

1 Введение

К настоящему времени получено много указаний, свидетельствующих о существовании тесной связи солнечной активности с различными земными явлениями (Пудовкин, Распопов, 1992; Авакян, Воронин, 2007). Так, взаимодействие корональных выбросов массы (КВМ) с магнитосферой Земли вызывает резкое сжатие ее атмосферы. Вследствие чего наблюдается рост градиента

приземного давления (Пудовкин, Бабушкина, 1990) и температуры (Пудовкин, Дементьева, 1997). Это инициирует быстрое формирование атмосферных фронтов, сопровождаемых обильными осадками и сильными ветрами. Исследования последних лет свидетельствуют также о влиянии Солнца на глобальное потепление климата Земли (Распопов и др., 2001; Харрисон, Стефенсон, 2005). По мнению некоторых авторов (Ривин, 1985; Бобова и др., 1990), даже землетрясения могут зависеть от солнечной активности. Считается, что под действием магнитных бурь в жидком ядре Земли индуцируются электрические токи, ответственные за появление пондемоторных сил. Благодаря последним возникают напряжения, вызывающие сдвиги и разломы в твердой коре Земли.

Неотъемлемым атрибутом активности Солнца, определяющим радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, являются солнечные космические лучи (СКЛ), которые состоят на 90 % из протонов, достигающих энергий ~ 10 ГэВ. Они способны приводить к повреждению искусственных орбитальных спутников и даже гибели космонавтов. Высокоэнергичные СКЛ, проникая в плотные слои атмосферы Земли, ионизируют нейтральные атомы, что стимулирует формирование центров конденсации водяного пара и, соответственно, облачного покрова (Авакян, Воронин, 2006).

В настоящее время считается, что СКЛ могут ускоряться либо в области вспышечного энерговыделения, либо в окружающей короне. В последнем случае ускорение происходит на фронтах ударных волн, которые могут генерироваться как вспышками, так и КВМ (Римс, 1999). Полученные к настоящему времени результаты не позволяют сделать однозначный вывод о том, какой из сценариев является более адекватным. Однако значительный прогресс в данном направлении исследований может быть достигнут благодаря использованию радионаблюдений.

Наиболее надежным индикатором ударных волн в короне Солнца являются радиовсплески II типа. За их генерацию ответствен плазменный механизм радиоизлучения (см., например, Кэрнс и др., 2003). Ускоренные на фронте ударной волны неравновесные электроны возбуждают ленгмюровские моды l с частотой, близкой к электронной плазменной f_e , которые трансформируются в наблюдаемые электромагнитные t путем распада ($l \rightarrow t(f_e) + s'$, s' – ионно-звуковая волна) или слияния ($l + l' \rightarrow t(2f_e)$) волн.

Длительное время из-за поглощения радиоволн земной атмосферой наблюдения радиовсплесков II типа ограничивались диапазоном метровых (m) длин волн, что соответствует высоте $R = (1.5 - 3)R_\odot$. Однако с запуском в 1994 г. спутника Wind появилась возможность исследовать не только корональные, но и межпланетные ($R > 3R_\odot$) ударные волны, исходя из радионаблюдений в декаметровом-гектометровом (ДН) волновом диапазоне. Это позволило получить чрезвычайно полезную информацию о распространении и ускорении заряженных частиц на больших расстояниях от Солнца.

В свете проблемы диагностики СКЛ не вызывает сомнений необходимость детального изучения континуальных радиовсплесков. Если микроволновые всплески характеризуют эффективность ускорения электронов в области вспышки (Ниндос и др., 2008), то всплески IV типа – развитие эруптивных процессов на Солнце и, соответственно, выход ускоренных частиц из области вспышечного энерговыделения (Калер, 1982; Кливер и др., 1986, 2004).

Таким образом, следует ожидать, что привлечение радионаблюдений позволит не только выяснить, где и как происходит ускорение СКЛ, но и заметно улучшит прогноз протонных событий.

2 Исходные данные и их обработка

При проведении исследований мы воспользовались наблюдательными данными, доступными через Интернет. Независимая выборка включала 107 протонных событий за период с 1989 по 2005 гг., из которых 87 сопровождалась радиовсплесками II типа в m - и ДН-диапазонах. Анализировались оригинальные наблюдения, полученные с помощью наземной сети RSTN (Radio Solar Telescope Network), а также космического аппарата Wind.

RSTN – это мировая сеть службы Солнца, созданная Исследовательской лабораторией ВВС США (Air Force Research Laboratory) с целью мониторинга солнечных вспышек, шумовых бурь и

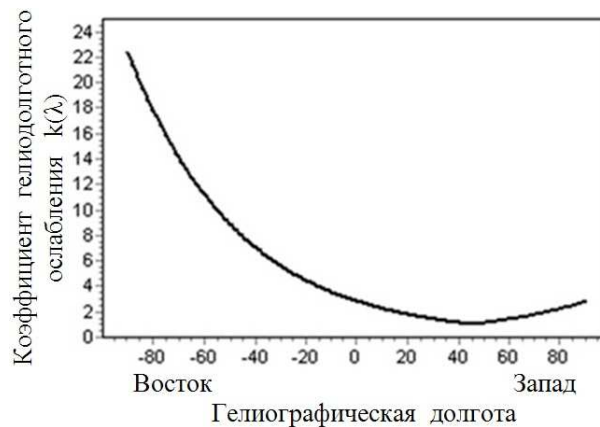


Рис. 1. Зависимость коэффициента ослабления потока интенсивности протонов СКЛ от гелиодолготы

других проявлений солнечной активности. Она включает систему антенн RIMS (Radio Interference Measurement Set), а также радиоспектрографов SRS (Solar Radio Spectrograph), размещенных в различных частях Земли. В сеть RSTN входят 4 наземные станции: Palehua (Гавайи), San Vito dei Normanni (Италия), Sagamore Hill (Массачусетс, США), RAAF (Royal Australian Air Force) Learmonth (Западная Австралия), что позволяет проводить непрерывный мониторинг радиоизлучения Солнца. В работе привлекались данные измерений, полученные на RSTN в диапазоне частот $f = 245\text{--}15400$ МГц и на SRS ($f = 25\text{--}299$ МГц) с временным разрешением 1 и 3 с соответственно. В эксперимент Waves/Wind (Бугерт и др., 1995) входили два радиометра, работающих в диапазонах 1.075–13.825 МГц и 20–1040 кГц, которым соответствуют расстояния $(1\text{--}20)R_{\odot}$ и $20R_{\odot} - 1$ AU. Сразу отметим, что скорость частотного дрейфа V_{II} принималась равной отношению наблюдаемого диапазона частот к длительности всплеска II типа.

Интегральные интенсивности потока протонов СКЛ $I_p(E_p)$ с энергиями $E_p > 1 - 100$ МэВ регистрировались на спутниках серии GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Поток протонов характеризовался максимальным значением интенсивности в различных спектральных интервалах I_p . При получении I_p учитывалось гелиодолготное ослабление, расчет которого проводился по формуле Очелкова (1986)

$$I_p = I_{p0}k(\lambda), k(\lambda) = 10^{0.01 \times |\lambda - 45^\circ|}, \quad (1)$$

где I_{p0} — наблюдаемая интенсивность, λ — гелиографическая долгота вспышки в градусах, $k(\lambda)$ — коэффициент ослабления (см. рис. 1).

3 Связь между частотой появления протонных событий и всплесками II типа

В отличие от Кливера и др. (2004), мы построили зависимость числа солнечных протонных событий (СПС) от λ с учетом гелиодолготного ослабления интенсивности СКЛ. Как видно из рис. 2, при любых λ вероятность появления СПС для m II- и ДН II-всплесков оказалась приблизительно одинаковой. Это несколько противоречит результатам Кливера и др. (2004), в соответствии с которыми кривые m II- и ДН II-всплесков на аналогичных графиках заметно расходятся.

Подобным образом ведут себя зависимости числа СПС от максимальных значений интенсивности протонов I_p , сопровождаемых либо m II-, либо ДН II-всплесками. На рис. 2 кривые для разных диапазонов практически совпадают, что указывает на их взаимосвязь.

На наш взгляд, полученные выше результаты свидетельствуют в пользу единой природы m II-

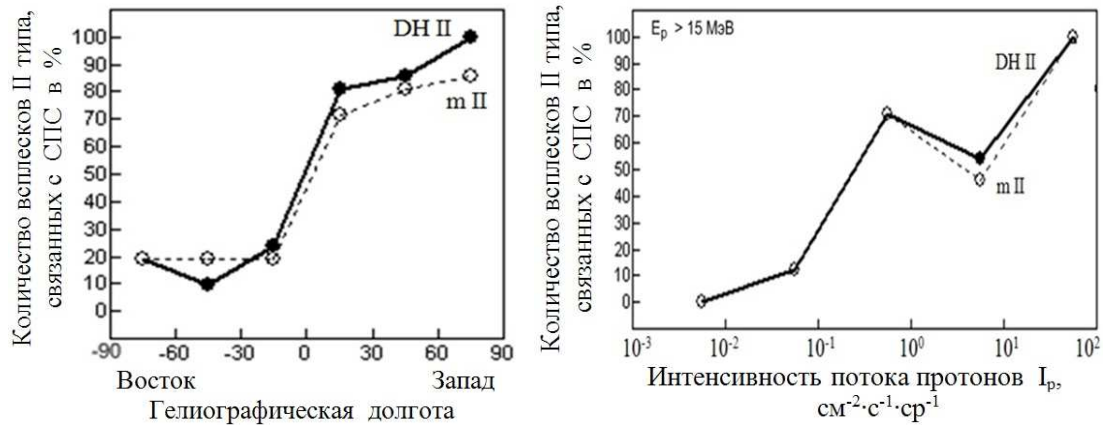


Рис. 2. Количество протонных событий в %, связанных с m II- и DH II-всплесками, в зависимости от гелиографической долготы (слева) и интенсивности потока протонов (справа)

и DH II-всплесков. Это предполагает, что межпланетные ударные волны являются продолжением ударных волн солнечной короны.

4 Зависимость показателя степени энергетического спектра протонов от гелиографической долготы

Следует ожидать, что ослабление потока протонов зависит не только от гелиографической долготы вспышки λ , но и от энергии протонов E_p . Так, если степень гелиодолготного ослабления потока протонов с увеличением E_p возрастает, то это должно приводить к соответствующему изменению показателя степени интегрального энергетического спектра протонов $\gamma = -\ln[I_p(E_p)/I_n]/\ln E_p$, где I_n – нормировочный коэффициент. Мы рассмотрели данный вопрос более обстоятельно.

Для принятой нами выборки СПС на рис. 3 показана зависимость $\gamma(\lambda)$, откуда нетрудно сделать вывод о наличии связи между гелиодолготой λ и показателем степени энергетического спектра протонов γ . Значение коэффициента корреляции составит приблизительно 0.60, т. е. ослабление потока протонов заметным образом зависит не только от гелиодолготы λ , но и от энергии последних E_p . Это может приводить к ошибкам при определении интенсивности I_p с помощью расчетной формулы (1), предложенной Очелковым (1986). Поэтому при рассмотрении интегральных интенсивностей $I_p(E_p)$ с различными значениями энергии E_p необходима ее корректировка.

5 Интенсивность потока протонов и скорость частотного дрейфа m II- и DH II-всплесков

Нами исследовалась также связь между интенсивностями потока протонов разных энергий $I_p(E_p)$ и скоростями частотного дрейфа всплесков m II (V_{mII}) и DH II (V_{DHII}). В качестве примера на рис. 4 показана зависимость для $I_p(E_p > 15 \text{ MeV})$. Как видно, знак $\tan \alpha$, где α – угол наклона регрессионной прямой, зависит от рассматриваемого радиодиапазона. Если для m II-всплесков $\tan \alpha > 0$, то для DH II-всплесков $\tan \alpha < 0$, т. е. рекуррентная функция становится убывающей. Следовательно, если с увеличением скорости дрейфа для m II-всплесков интенсивность потока протонов I_p в среднем увеличивается, то для DH II-всплесков, наоборот, уменьшается.

Приняв во внимание результаты предыдущего раздела, мы исследовали зависимость коэффициента корреляции между интенсивностью потока протонов и скоростью дрейфа $r(I_p, V_{II})$ от E_p как с учетом, так и без учета гелиодолготного ослабления. Рисунок 5 показывает, что если в диапазоне

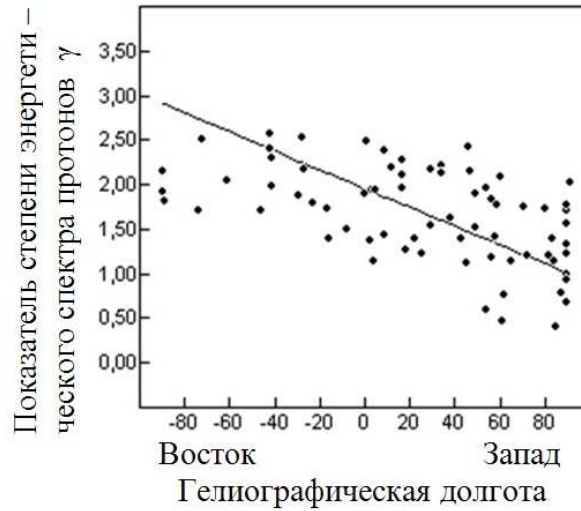


Рис. 3. Зависимость показателя степени интегрального энергетического спектра протонов γ от гелиографической долготы протонной вспышки

и его значения увеличивались с ростом энергии протонов E_p , то в ДН, наоборот, уменьшались. Следует также обратить внимание на усиление роли гелиодолготного ослабления для высокоэнергичных частиц применительно к m II-всплескам. Об этом, в частности, свидетельствует заметная разница между значениями $r(I_p, V_{mII})$, достигающая 0.10, для протонов с $E_p > 100$ МэВ. Причем в случае ДН II-всплесков коэффициент корреляции не превысил 0.40, и для низкоэнергичных частиц учет гелиодолготы λ практически не сказывается на величинах $r(I_p, V_{DII})$. Возможно, это вызвано невысокой точностью измерений интенсивности потока протонов I_p заданных энергий.

В заключение этого раздела попытаемся выяснить физическую причину обнаруженного нами расхождения в поведении протонов для m II- и ДН II-всплесков (рис. 4, 5) на основе представлений о дрейфовом и диффузионном ускорении заряженных частиц на фронтах ударных волн. В общем случае темп набора энергии частицами $dE_p/dt \propto u^\beta$, где u – скорость распространения волны и показатель степени $\beta = 1 - 2$ (Исаева, Цап, 2011). Откуда следует, поскольку плазменная частота $f_e \propto \sqrt{n}$, где n – концентрация электронов, то (Исаева, Цап, 2011)

$$V_{II} \propto u \propto (dE_p/dt)^{1/\beta}. \quad (2)$$

Таким образом, с одной стороны, рис. 4, 5 и соотношение (2) свидетельствуют о заметном вкладе ударных волн в ускорение СКЛ на высотах $R = (1.5 - 3)R_\odot$, а с другой – о значительном снижении эффективности этого процесса для энергичных частиц в межпланетном пространстве, где генерируются ДН II-всплески.

6 Радиоизлучение вспышек и модель двухступенчатого ускорения СКЛ

Обнаруженная нами достаточно слабая корреляция (< 0.40) между интенсивностью I_p и скоростью дрейфа V_{II} не позволяет сделать вывод в пользу определяющего ускорения протонов на фронтах ударных волн. Между тем ранее Мельниковым и др. (1986, 1991) была установлена достаточно сильная связь между интенсивностью потока СКЛ и параметрами микроволнового излучения СПС. Значения коэффициентов корреляции для частиц с $E_p > 25$ МэВ достигали 0.82. Это предполагает необходимость учета континуальных вспышек при рассмотрении связи СКЛ с параметрами радиоизлучения.

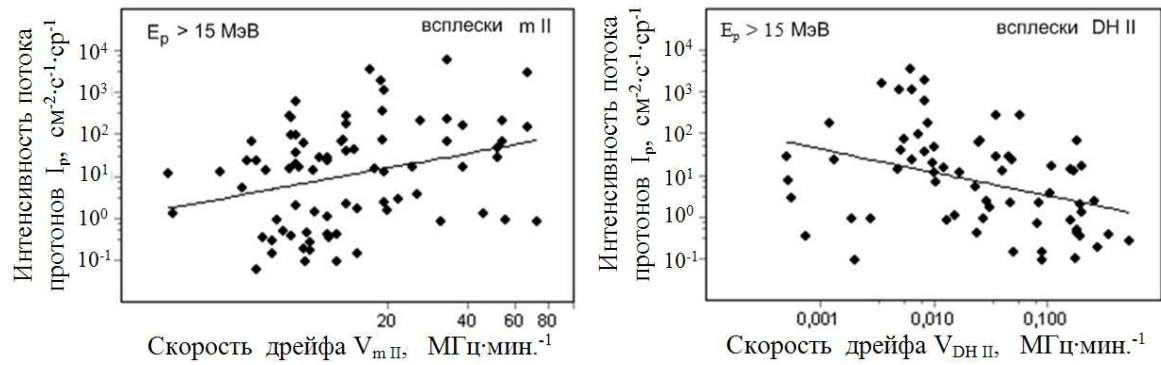


Рис. 4. Зависимости интенсивности потока протонов I_p от скорости дрейфа V_{II} для m II-всплесков и DN II-всплесков

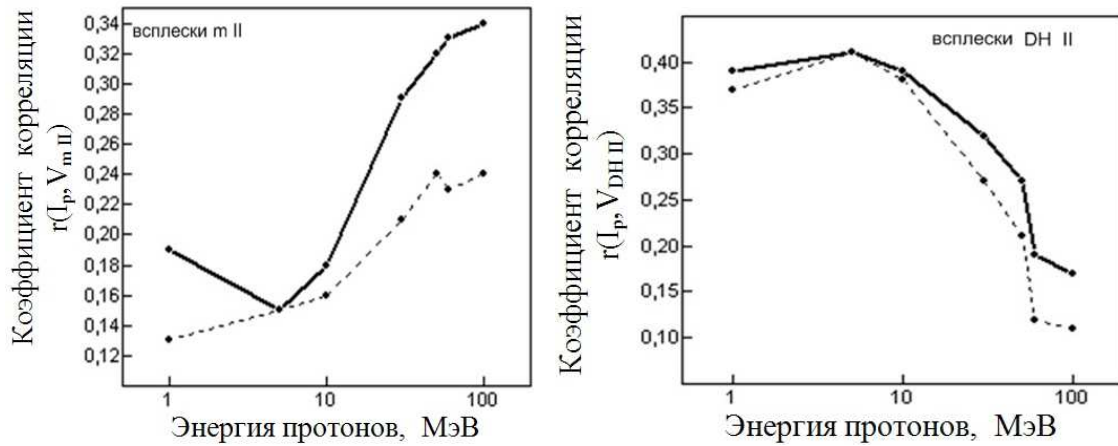


Рис. 5. Зависимость коэффициента корреляции $r(I_p, V_{II})$ между потоком протонов I_p и скоростью частотного дрейфа V_{II} от энергии протонов E_p с учетом гелиодолготного ослабления (сплошная линия) и без учета гелиодолготного ослабления (пунктирная линия) для m II-всплесков и DN II-всплесков

Для того, чтобы оценить относительную роль ударных волн и условий выхода ускоренных протонов из области вспышечного энерговыделения в генерации СКЛ мы отобрали СПС, которые сопровождалась непрерывными микроволновыми (μ) и декаметровыми (d) всплесками IV типа, а также m II-всплесками. Исследовалась связь интенсивности СКЛ со следующими параметрами: максимальным значением потока радиоизлучения $F_{\mu,d}$, эффективной длительностью всплеска $T_{\mu,d}$, спектральным максимумом $f_{\mu,d}$ и скоростью частотного дрейфа V_{mII} . За период с 2001 по 2006 гг. было отобрано 39 вспышек с отмеченными выше особенностями.

На рис. 6 представлены зависимости значений коэффициента корреляции $r(I_p, I_{pr})$ от энергии протонов E_p , для которых расчетные значения интенсивности I_{pr} находились на основе следующих формул

$$\lg I_{pr} = k_1 \lg F_{\mu} + k_2 \lg T_{\mu} + k_3 \lg f_{\mu} + \text{const}; \quad (3)$$

$$\lg I_{pr} = k_1 \lg F_{\mu} + k_2 \lg T_{\mu} + k_3 \lg f_{\mu} + k_4 \lg F_d + k_5 \lg T_d + k_6 \lg f_d + \text{const}; \quad (4)$$

$$\lg I_{pr} = k_1 \lg F_{\mu} + k_2 \lg T_{\mu} + k_3 \lg f_{\mu} + k_4 \lg F_d + k_5 \lg T_d + k_6 \lg f_d + k_7 \lg V_{mII} + \text{const}; \quad (5)$$

где k_1, k_2, k_3, \dots – коэффициенты линейной регрессии, определяемые с помощью метода наименьших квадратов.

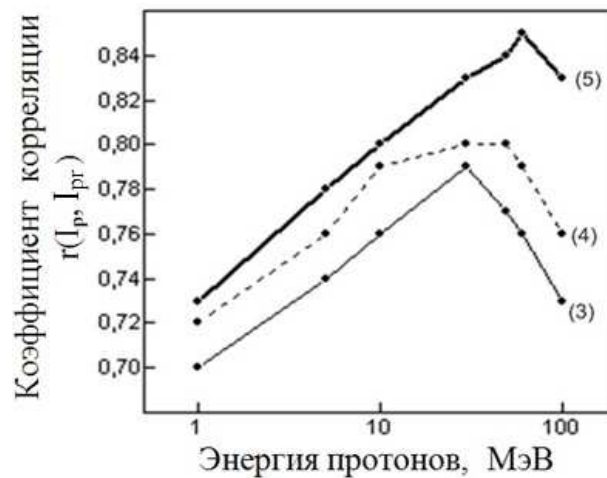


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции $r(I_p, I_{pr})$ между наблюдаемыми (I_p) и расчетными (I_{pr}) значениями интенсивности от энергии протонов E_p . Функция I_{pr} находилась согласно уравнениям (3)–(5). Тонкая сплошная линия соответствует уравнению (3); пунктирная сплошная линия – (4); толстая сплошная линия – (5)

Кривая (3) рис. 6 свидетельствует о достаточно сильной корреляции интенсивности протонов с микроволновыми всплесками ($r(I_p, I_{pr}) = 0.70 - 0.78$), что предполагает доминирующую роль ускорения СКЛ во вспышечной области. Однако в рассматриваемом случае не учитывались параметры, характеризующие инжекцию частиц в окружающую корону. Это можно сделать, приняв во внимание декаметровые радиовсплески IV типа. Если учесть данное обстоятельство путем включения в уравнение (4) потока радиоизлучения F_d , длительности T_d и частоты спектрального максимума f_d декаметрового всплеска, то, согласно рис. 6, значения $r(I_p, I_{pr})$ еще несколько увеличатся.

Было бы естественно предположить, что корреляция должна возрасти, если учесть скорость частотного дрейфа V_{mII} (см. уравнение (5)), от которого зависит интенсивность ударной волны и, соответственно, темп набора энергии заряженными частицами. Как видно из рис. 6., это действительно так, в максимуме $r(I_p, I_{pr}) \approx 0.85$, что свидетельствует в пользу классической модели двухступенчатого ускорения заряженных частиц в солнечных вспышках (Вайлд и др., 1963). Причем сравнительно небольшое увеличение коэффициента корреляции по сравнению с первым случаем, описываемым формулой (3), также предполагает основное ускорение СКЛ в источнике вспышки. Однако в отличие от ударных волн, его эффективность при больших E_p с увеличением энергии падает (рис. 7).

7 Обсуждение результатов и выводы

В представленной работе на основе анализа статистических закономерностей рассмотрена связь между интенсивностью потока протонов и параметрами солнечных радиовсплесков. Нами было показано, что ускорение СКЛ определяется процессами в области вспышечного энерговыделения. Вместе с тем ударные волны также вносят определенный вклад, который с ростом энергии частиц увеличивается. Следовательно, были получены веские аргументы в пользу модели двухступенчатого механизма ускорения СКЛ, предложенной еще полвека назад Вайлдом и др. (1963).

О доминирующем ускорении СКЛ в области вспышечного энерговыделения свидетельствуют также результаты статистического анализа, учитывающие параметры жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ). Напомним, что в соответствии с существующими представлениями, это нетепловое

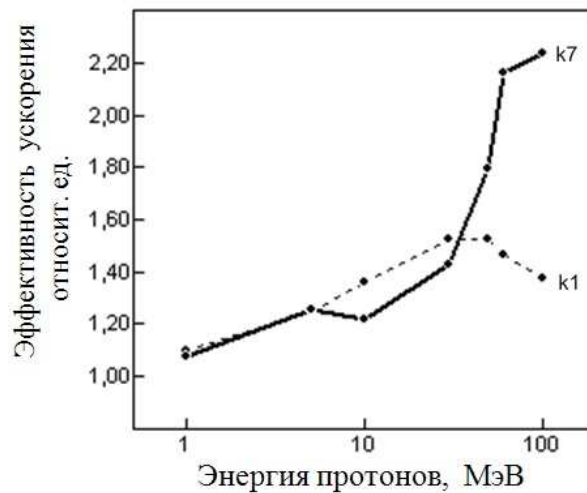


Рис. 7. Зависимость коэффициентов линейной регрессии k_1 и k_7 , характеризующих ускорение в источнике вспышки и окружающей короне, от энергии протонов E_p

тормозное излучение генерируется в результате бомбардировки быстрыми электронами, ускоренными в корональных петлях, плотных слоях переходной области и верхней хромосферы Солнца. Поэтому корреляцию между энергичными протонами и ЖРИ можно рассматривать как свидетельство вспышечной природы СКЛ.

Киплингер (1995) впервые обратил внимание на тесную связь между динамикой спектра ЖРИ и СКЛ. Дальнейшие исследования подтвердили эти результаты. Например, в работе Салданы и др. (2008) проанализировано пять вспышек рентгеновского класса X, наблюдавшихся в январе 2005 г. на спутнике RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager). Было установлено, что СПС возникают, если по крайней мере для отдельных пиков излучения относительное содержание высокоэнергичных электронов со временем увеличивается, т. е. спектр становится более жестким (показатель спектра ведет себя как soft-hard-hard). Лишь одно событие, для которого было характерно спектральное поведение soft-hard-soft, не сопровождалось СКЛ. В свою очередь, Грейсон и др. (2009) исследовали 37 событий конца 23 цикла не только X-, но и M-класса, лежащие на западном диске Солнца в пределах гелиодолгот W30–W90. Согласно полученным результатам, 12 из 18 событий со спектром ЖРИ soft-hard-hard сопровождалось СКЛ, тогда как для “нормальных” 19 вспышек (soft-hard-soft) СКЛ обнаружены не были. Отмеченные выше работы весьма убедительно свидетельствуют о доминирующей роли ускорения СКЛ в области вспышечного энерговыделения.

Отметим также недавно обнаруженную Чертком и др. (2009) зависимость между спектрами микроволнового излучения и энергичными протонами. По результатам измерений за период с 1987 по 2008 гг. было установлено, что микроволновым всплескам с жестким частотным радиоспектром, для которых на 9 и 15 ГГц отношение пиковых плотностей потоков $F_9/F_{15} \leq 1$ и частота спектрального максимума $f_m \geq 15$ ГГц, соответствуют протонные потоки с малыми показателями энергетического спектра ≤ 1.5 . Откуда был сделан вывод об ускорении СКЛ в процессе импульсного и постэруптивного энерговыделения, а не на фронтах ударных волн, генерируемых КВМ.

Нами были получены указания, что межпланетные ударные волны являются продолжением корональных. Это следует из обнаруженной тесной связи радиовсплесков II типа в различных диапазонах длин волн как с интенсивностью потока протонов, так и гелиодолготой. Данное предположение хорошо согласуется и с выводом об относительно малой эффективности ускорения СКЛ межпланетными ударными волнами, что естественным образом объясняется уменьшением плотности волнового потока энергии последних \mathcal{F} с расстоянием R ($\mathcal{F} \propto R^{-2}$).

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что приведенные выше выводы основываются на ста-

статистических закономерностях и не являются универсальными. Поэтому некоторые события могут обладать особенностями, которые нельзя описать в рамках принятой модели, что требует отдельного рассмотрения.

Авторы статьи выражают свою признательность Б.М. Владимирскому за внимательное прочтение работы и сделанные полезные замечания.

Литература

- Авакян С.В., Воронин Н.А. // Оптический журнал. 2006. Т. 73. С. 78.
- Авакян С.В., Воронин Н.А. // Исследование Земли из космоса. 2007. Т. 2. С. 23.
- Бобова В.П., Осипов К.С., Савина Н.Г., Владимирский Б.М., Пудовкин М.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. С. 492.
- Бугерт и др. (Bougeret J.L., Kaiser M.L., Kellogg P.J., et al.) // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 231.
- Вайлд и др. (Wild J.P., Smerd S.F., Weiss A.A.) // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1963. V. 1. P. 291.
- Грейсон и др. (Grayson J.A., Krucker S., Lin R.P.) // Astrophys. J. 2009. V. 707. P. 1588.
- Исаева Е.А., Цап Ю.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2011. Т. 107. С. 118.
- Калер (Kahler S.W.) // Astrophys. J. 1982. V. 305. P. 920.
- Киплингер (Kiplinger A.L.) // Astrophys. J. 1995. V. 453. P. 973.
- Кливер и др. (Cliver E.W., Dennis B.R., Kiplinger A.L., et al.) // Astrophys. J. 1986. V. 305. P. 920.
- Кливер и др. (Cliver E.W., Kahler S.W., Reames D.V.) // Astrophys. J. 2004. V. 605. P. 902.
- Кэрнс и др. (Cairns I.H., Knock S.A., Robinson P.A., Kuncic Z.) // Space Sci. Rev. 2003. V. 107. P. 27.
- Мельников В.Ф., Подстригач Т.С., Курт В.Г., Столповский В.Г. // Космические исследования. 1986. Т. XXIV. С. 610.
- Мельников В.Ф., Подстригач Т.С., Дайбог Е.И., Столповский В.Г. // Космические исследования. 1991. Т. 29. С. 95.
- Ниндос и др. (Nindos A., Aurass H., Klein K.-L., Trottet G.) // Solar Phys. 2008. V. 253. P. 3.
- Очелков Ю.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. С. 1007.
- Пудовкин М.И., Бабушкина С.В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. С. 469.
- Пудовкин М.М., Распопов О.М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. С. 1.
- Пудовкин М.И., Дементьева А.Л. // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. С. 84.
- Распопов О.М., Шумилов О.И., Касаткина Е.А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41. С. 420.
- Ривин Ю.Р. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. С. 990.
- Римс (Reames D.V.) // Space Sci. Rev. 1999. V. 90. P. 413.
- Салданья и др. (Saldanha R., Krucker S., Lin R.P.) // Astrophys. J. 2008. V. 673. P. 1169.
- Харрисон, Стефенсон (Harrison R.G., Stephenson D.B.) // Proceedings of Royal Society Ser. A. 2005. V. 462. P. 1221.
- Черток И.М., Гречнев В.В., Мешалкина Н.С. // Астрон. журн. 2009. Т. 86. С. 1133.